

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ГАЗОМАЗУТНОЙ ГОРЕЛКИ ДЛЯ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Инж. ЖИХАР И. Г.

ОАО «Мотовело»

При двухступенчатом сжигании жидкого топлива в камере газомазутной горелки происходит газификация топлива, так как коэффициент избытка воздуха в камере горелки меньше единицы. Поэтому в газификационной камере горелки появляются продукты неполного сгорания CO и H₂, а при коэффициенте избытка воздуха в газификационной камере $\alpha_1 < 0,6$ появляется еще и углерод C.

В [1] приведен состав продуктов сгорания, полученный в результате газификации мазута М100 в газогенераторе. Состав продуктов сгорания представлен на рис. 1. Как видно, в продуктах неполного сгорания содержание CO, H₂ и CO₂ меняется с изменением коэффициента избытка воздуха α_1 в газогенераторе.

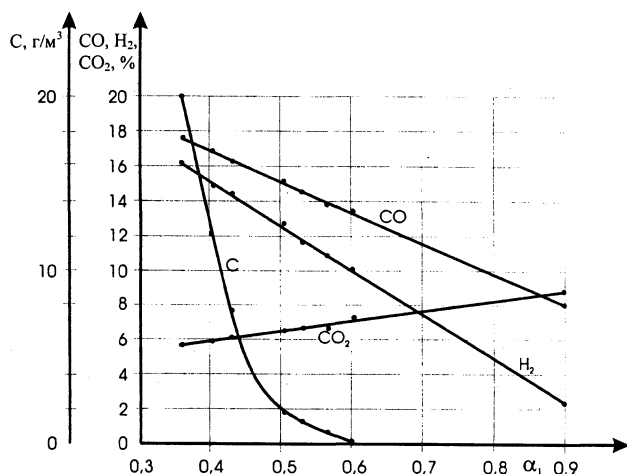


Рис. 1. Состав продуктов сгорания, полученный в результате газификации мазута М100 в газогенераторе в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Изменение содержания компонентов в продуктах неполного сгорания при газификации мазута описывается следующими уравнениями:

$$\text{CO} = 8 + (0,9 - \alpha_1) \cdot 17,2727, \% \quad (1)$$

$$\text{H}_2 = 2,6 + (0,9 - \alpha_1) \cdot 24,7272, \% \quad (2)$$

$$\text{CO}_2 = 8,6 - (0,9 - \alpha_1) \cdot 5,4545, \% \quad (3)$$

Зависимости справедливы при $\alpha_1 = 0,36 \dots 0,90$.

Содержание углерода в продуктах газификации мазута (рис. 1) можно описать следующим образом:

$$\text{C} = 11,1 + (0,45 - \alpha_1) \cdot 287,777$$

$$\text{при } \alpha_1 = 0,36 \dots 0,45;$$

$$\text{C} = (\alpha_1 - 0,6)^2 \cdot 493,33 \quad \text{при } \alpha_1 = 0,45 \dots 0,6.$$

Полный объем продуктов сгорания, получаемых при сгорании 1 кг жидкого топлива:

$$V_{\Gamma} = V_{\text{с.г.}} + V_{\text{в.п.}}, \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Объем сухих дымовых газов при неполном сгорании, когда в продуктах сгорания находятся CO, H₂, CH₄ и C_nH_m, равен [2]

$$V_{\text{с.г.}} = 1,86 \frac{K^P}{\text{RO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + 2\text{C}_n\text{H}_m} Z, \text{ м}^3/\text{кг.},$$

где $K^P = C^P + 0,375S_{\text{ор+к}}^P$; $Z = \frac{100 - q_4}{100}$ — поправочный коэффициент на механическую неполноту сгорания топлива.

Объем водяных паров при наличии в продуктах сгорания H₂ и CH₄ равен

$$V_{\text{в.п.}} = 0,0124 \left[9H^P Z - \frac{9K^P(0,09\text{H}_2 + 0,18\text{CH}_4)}{0,54(\text{RO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4)} Z + W^P + 100(W_{\text{в.}} + W_{\text{ф.}}) \right], \text{ м}^3/\text{кг.},$$

где W_ϕ – влага парового распыливания топлива при применении паромазутных форсунок – 0,3...0,4 кг/кг, паромеханических – 0,03...0,04 кг/кг; W_b – влага, вносимая в топку с воздухом, кг/кг сгоревшего топлива:

$$W_b = 0,001\alpha L_0 d_b,$$

где L_0 – массовый расход влажного воздуха, необходимого для сжигания 1 кг топлива; d_b – влагосодержание воздуха, г/кг (обычно $d_b \approx 10$ г/кг).

По формулам (1)–(3) при принятом α_1 находим содержание CO_2 , CO и H_2 в продуктах неполного сгорания в газификационной камере горелки.

Далее определяем теплоту от химического недожога топлива по формуле

$$Q_3 = V_{c.r.}(126,44\text{CO} + 108\text{H}_2 + 358,2\text{CH}_4)Z, \text{ кДж/кг.}$$

Или

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_p} \cdot 100 \, \%.$$

Степень полноты тепловыделения в газификационной камере горелки

$$\varphi = 100 - q_3, \, \%.$$

Определяем теоретическую температуру горения в газификационной камере горелки

$$t_{\text{теор}} = \frac{\varphi Q_p + I_b}{C_r V_r^{\alpha_1}}, \, ^\circ\text{C}.$$

Предварительно принимаем температуру газов на выходе из газификационной камеры горелки T_k'' , которая в дальнейшем уточняется расчетом.

Средняя эффективная температура факела в камере горелки определяется по формуле

$$T_\phi \approx \frac{T_{\text{теор}} + T_k''}{2}.$$

Степень черноты газификационной камеры горелки равна [3]

$$a_k = \frac{a_\phi}{a_\phi + (1 - a_\phi)\psi_{cp}},$$

где a_ϕ – эффективная степень черноты факела; ψ_{cp} – коэффициент тепловой эффективности газификационной камеры.

Эффективная степень черноты факела определяется по формуле

$$a_\phi = m a_{cb} + (1 - m) a_r.$$

Величины же a_{cb} и a_r находятся из выражений:

$$a_{cb} = 1 - e^{-(k_r r_n + k_c)PS};$$

$$a_r = 1 - e^{-k_r r_n PS}.$$

Коэффициент m равен единице для мазута при $q_v \geq 1000$ кВт/м³.

Коэффициент ослабления лучей для трехатомных газов определяется по формуле

$$k = k_r r_n = \left(\frac{7,8 + 16r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{r_n s}} - 1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T_k''}{1000} \right) r_n.$$

Коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами находим из выражения

$$k_c = 0,3(2 - \alpha_1) \left(1,6 \frac{T_k''}{1000} - 0,5 \right) \frac{C^p}{H^p}.$$

Эффективная толщина излучающего слоя в газификационной камере горелки вычисляется по формуле

$$s = 3,6 \frac{V_k}{F_{ct}}, \text{ м.}$$

Температуру внутренней ошипованной стенки газификационной камеры горелки определяем из выражения [4]

$$T_{ct} = -0,5\sqrt{2x} + \sqrt{\frac{b}{2\sqrt{2x}}} - 0,5x,$$

$$\text{где } x = \sqrt[3]{\frac{b^2}{16} + \sqrt{\frac{b^4}{256} + \frac{c^3}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{b^2}{16} - \sqrt{\frac{b^4}{256} + \frac{c^3}{27}}}.$$

Величины b и c находятся по выражениям:

$$b = \frac{R_{ш.с}^{np} \alpha_k + 1}{R_{ш.с}^{np} 5,67 \cdot 10^{-11} \alpha_k};$$

$$c = T_{\phi}^4 + \frac{T_{ср} + R_{ш.с}^{np} \alpha_k T_{\phi}}{5,67 \cdot 10^{-11} \alpha_k R_{ш.с}^{np}}.$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией в газификационной камере определяется по формуле [4]

$$\alpha_k = 0,0065 \frac{\lambda_r W_{вх}}{V_r}, \text{ кВт/(м}^2\text{К)}.$$

Приведенное термическое сопротивление ошипованной стенки газификационной камеры горелки находится из выражения [5]

$$R_{ш.с}^{np} = \frac{R_1 R_2}{f_{ш} R_2 + (1 - f_{ш}) R_1},$$

где

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_2} + R_{ст} + R_{ш} + R_{н} + R_{шл} \approx R_{ш} + R_{н} + R_{шл};$$

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_2} + R_{ст} + R_{н} + R_{шл} \approx R_{н} + R_{шл}.$$

Для плоской ошипованной стенки

$$f_{ш} = 0,785 \frac{d_{ш}^2}{s_1 s_2},$$

где $f_{ш}$ – плотность шипования; $d_{ш}$ – диаметр шипа; s_1 – шаг шипов в ряду; s_2 – поперечный шаг шипов.

Термическое сопротивление шипа

$$R_{ш} = \frac{l_{ш}}{\lambda_{ш}},$$

где $l_{ш}$ – длина шипа, м; $\lambda_{ш}$ – коэффициент теплопроводности шипа, Вт/(м²·К).

Термическое сопротивление футеровки над шипом

$$R_{н} = \frac{\delta_{н}}{\lambda_{н}},$$

где $\delta_{н}$ – толщина футеровки над шипом, м; $\lambda_{н}$ – коэффициент теплопроводности футеровки, Вт/(м²·К).

Термическое сопротивление слоя шлака над шипом $R_{шл}$ при сжигании мазута равно нулю.

Термическое сопротивление футеровки между шипами определяется из выражения

$$R_{н} = \frac{l_{ш} + \delta_{н}}{\lambda_{н}}.$$

Суммарное термическое сопротивление шипа и футеровки над шипом равно

$$R_1 = R_{ш} + R_{н}.$$

Термическое сопротивление футеровки между шипами и шлаковой пленкой

$$R_2 = R_{н} + R_{шл} = R_{н},$$

где $R_{шл} = 0$.

Удельное тепловосприятие стен газификационной камеры горелки

$$q = \alpha_k (T_{\phi} - T_{ст}) + 5,67 \cdot 10^{-11} \alpha_k (T_{\phi}^4 - T_{ст}^4), \text{ кВт/м}^2.$$

Количество теплоты, воспринятой стенкой газификационной камеры:

$$Q_k^{ст} = \frac{q F_k}{B_r},$$

где F_k – внутренняя поверхность стенки газификационной камеры.

Энтальпия газов на выходе из газификационной камеры горелки

$$I_k = \Sigma(Vc)t_k = Q_k - Q_k^{ст} = \Phi Q_{н}^p + I_{в} - Q_k^{ст}.$$

По значению I_k находим температуру газов на выходе из камеры

$$t_k = \frac{I_k}{c_r V_r}.$$

Полученное значение температуры t_k сравниваем с предварительно принятым. Расхождение между ними не должно превышать ± 50 °С.

В противном случае температуру газов на выходе из газификационной камеры горелки принимаем во втором приближении как среднее арифметическое между $t_k^{\text{прин}}$, принятой в первом приближении и полученной расчетной $t_k^{\text{расч}}$, т. е. $t_k = \frac{t_k^{\text{прин}} + t_k^{\text{расч}}}{2}$, и уточняем расчет.

Температура наружной стенки газификационной камеры горелки со стороны вторичного воздуха определяется по формуле

$$t_{\text{ст}}^{\text{н}} = t_{\text{ст}}^{\text{вн}} - \frac{q}{2\lambda_{\text{ст}}^{\text{пр}}} d_1 \ln \frac{d_2}{d_1},$$

где $\lambda_{\text{ст}}^{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент теплопроводности ошпированной стенки газификационной камеры горелки, $\lambda_{\text{ст}}^{\text{пр}} = \frac{l_{\text{ш}} + \delta_{\text{н}}}{R_{\text{ш.с}}^{\text{пр}}}$; q – удельное тепловосприятие стенки газификационной камеры, кВт/м²; d_1 – внутренний диаметр газификационной камеры, м; d_2 – то же наружный, м.

Количество теплоты, воспринятой охлаждающим вторичным воздухом, равно

$$Q = V_{\text{в}} c_{\text{в}} \Delta t_{\text{в}}.$$

Количество теплоты, переданной наружной поверхностью газификационной камеры горелки вторичному воздуху, равно:

$$Q = \alpha_{\text{к}} (t_{\text{ст}}^{\text{н}} - t_{\text{об}}) H,$$

где $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией со стороны наружной стенки газификационной камеры.

Значение $\alpha_{\text{к}}$ определяется из выражения [6]

$$\text{Nu} = 0,043 \text{Re}^{0,8}.$$

Откуда

$$\alpha_{\text{к}} = 0,043 \left(\frac{\lambda_{\text{в}} w_{\text{в}}}{\nu_{\text{в}}} \right)^{0,8}.$$

Температура вторичного воздуха после подогрева его в воздушной рубашке газификационной камеры горелки

$$t_{\text{г.в}} = t_{\text{в}} + \frac{Q}{c_{\text{в}} V_{\text{в}}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

ВЫВОД

Рассмотрены особенности метода теплового расчета газомазутной горелки для двухступенчатого сжигания жидкого топлива, в соответствии с которым будет приведен численный пример теплового расчета газомазутной горелки для двухступенчатого сжигания мазута применительно к котлу ДКВР-10-13.

ЛИТЕРАТУРА

1. Синякевич Б. Г., Белоцерковский В. Л., Рыцлин В. А. Особенности теплового расчета предкамерной газомазутной горелки // Энергомашиностроение. – 1976. – № 7. – С. 30–34.
2. Трёмбля В. И., Фингер Е. Д., Авдеева А. А. Теплотехнические испытания котельных установок. – М.: Энергия, 1977. – 297 с.
3. Липов Ю. М., Самойлов Ю. Ф., Виленский Т. В. Компоновка и тепловой расчет парового котла. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.
4. Жихар Г. И. Физико-химические процессы в газомазутных котлах. – Мн.: Тэхналогія, 2002. – 325 с.
5. Маршак Ю. Л., Рыжаков А. В. Шиповые экраны топок паровых котлов. – М.: Энергия, 1969. – 240 с.
6. Шатиль А. А. Сжигание природного газа в камерах газотурбинных установок. – Л.: Недра, 1972. – 232 с.